

**Anna Carolina Nametala
Finamore**

**Proteção de Receptores de
Enlaces Terrestres contra a
Interferência Gerada por
Satélites em Órbitas
Altamente Inclínadas**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica**

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Anna Carolina Nametala Finamore

**Proteção de Receptores de Enlaces
Terrestres contra a Interferência Gerada
por Satélites em Órbitas Altamente
Inclinadas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de En-
genharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Anna Carolina Nametala Finamore

**Proteção de Receptores de Enlaces
Terrestres contra a Interferência Gerada
por Satélites em Órbitas Altamente
Inclinadas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Raimundo Sampaio Neto

CETUC PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes

IME

Prof. Weiler Alves Finamore

CETUC PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de Setembro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Anna Carolina Nametala Finamore

Graduou-se em Engenharia Elétrica (ênfases em Telecomunicações e em Sistemas de Apoio à Decisão) e em Engenharia de Produção Elétrica na PUC-Rio em janeiro de 2003.

Ficha Catalográfica

Finamore, Anna Carolina Nametala

Proteção de Receptores de Enlaces Terrestres contra a Interferência Gerada por Satélites em Órbitas Altamente Inclinadas/ Anna Carolina Nametala Finamore; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

v., 116 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica - Dissertação. 2. Comunicações via Satélite. 3. Satélites em Órbitas Altamente Inclinadas. 4. Serviço Fixo Terrestre. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

À minha família, por tudo.

Ao Professor José Mauro, pela orientação, amizade, confiança e estímulos sempre presentes no decorrer deste trabalho.

Aos Professores Raimundo Sampaio Neto e Weiler Alves Finamore pelos conhecimentos transmitidos e pela amizade.

Aos colegas do CETUC, em especial a Tiago Vinhoza, Miguel Freitas e Fabian Backx, pela atenção e companheirismo.

Aos colegas da Star One, em especial a Hécio Sarapecck e José Luiz Novo, pela compreensão e amizade.

À Vice-Reitoria Acadêmica pelo apoio financeiro.

Resumo

Finamore, Anna Carolina Nametala; Fortes, José Mauro Pedro. **Proteção de Receptores de Enlaces Terrestres contra a Interferência Gerada por Satélites em Órbitas Altamente Inclínadas**. Rio de Janeiro, 2005. 116p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A proteção de receptores do Serviço Fixo Terrestre de interferências produzidas por outros sistemas de comunicações é garantida, em determinadas faixas de frequência, através de condições que devem ser satisfeitas pela função distribuição de probabilidade da razão interferência-ruído térmico (I/N). A garantia de atendimento a estas condições deve ser obtida impondo-se restrições às potências de transmissão dos satélites interferentes. Estas restrições são estabelecidas através de máscaras que definem limites máximos permissíveis para a densidade de fluxo de potência que cada um dos satélites interferentes produz sobre a superfície da Terra. É, portanto, importante que ao se definir a máscara de densidade de fluxo de potência que irá restringir as transmissões dos satélites, se tenha a certeza de que a máscara escolhida garanta que os critérios de proteção do Serviço Fixo Terrestre sejam atendidos. O presente trabalho analisa, através da simulação do movimento dos satélites envolvido, a proteção dada aos receptores do Serviço Fixo Terrestre por diferentes máscaras de densidade de fluxo de potência. O resultado obtido é de grande importância na escolha da máscara a ser utilizada.

Palavras-chave

Interferência, Satélites em órbitas altamente inclinadas, Critérios de proteção.

Abstract

Finamore, Anna Carolina Nametala; Fortes, José Mauro Pedro. **Protection of Fixed Service Receivers from the Interference Generated by Highly Inclined Orbit Satellites**. Rio de Janeiro, 2005. 116p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The protection of Fixed Service receivers from the interference produced by others communications systems is guaranteed, in some frequency band, by some constraints to be satisfied the cumulative probability distribution function of the ratio interference-to-thermal noise, I/N . To make sure that these constraints are satisfied, limits are imposed to the interfering system transmitting power levels. These limits are usually established by power flux density (*pf**d*) masks that define the maximum allowed values of power flux density that the interfering satellites can produce on the Earth surface. It is therefore important that, in defining these *pf**d* masks, the Fixed Service protection criterion is satisfied. This work analyzes, through the the simulation of the satellite motion, the protection given to Fixed Service receiver by different power flux-density masks. The obtained results are important for choosing the mask to be adopted.

Keywords

Interference, Highly inclined orbit satellites, protection criteria

Conteúdo

1	Introdução	14
2	Descrição do Problema	17
2.1	Critérios de proteção	19
2.2	Tipos de análise	22
3	Modelagem Matemática	25
4	Análise de situações específicas de interesse	39
4.1	Resultados Numéricos	49
5	Conclusão	63
A	Conjunto de Diagramas de Azimutes	65
B	Alguns Aspectos da Mecânica Orbital	106
	Bibliografia	112

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de máscara de densidade de fluxo de potência.	18
2.2	Posicionamento dos receptores-vítima na simulação por rotas (D caracteriza a direção da rota).	23
2.3	Posicionamento dos receptores-vítima na simulação estação por estação.	24
3.1	Interferência produzida por vários satélites. ϵ é o ângulo de chegada do sinal interferente em um receptor FS	25
3.2	Geometria considerada levando em conta o diagrama de radiação do satélite HEO	27
3.3	Ilustração do ponto de tangência ϵ^* entre as curvas da máscara de pfd $p(\epsilon)$ e do ganho da antena do satélite $G(f(\epsilon))$	28
3.4	Exemplo de distribuições de probabilidade cumulativas da razão I/N . Cada curva corresponde a um valor diferente do azimute da direção de apontamento da antena receptora do FS	30
3.5	Ilustração do nível y_1 da razão I/N que é excedido com probabilidade 0.2	31
3.6	Ilustração da variação de y_i com azimutes α	32
3.7	Exemplo de curvas de y_1 , y_2 e y_3 versus os azimutes α da direção de apontamento da antena do receptor FS (coordenadas polares).	34
3.8	Exemplo de diagramas de azimute correspondentes a receptores FS localizados em diferentes longitudes.	36
3.9	Exemplo de um conjunto de diagramas de azimutes que reflete a proteção de um receptor FS localizado na posição $(0^\circ, 0^\circ)$ para uma antena receptora do FS cujo ganho é de 39dBi.	38
4.1	Máscaras consideradas no estudo desenvolvido.	40
4.2	Trilhas terrestres correspondentes ao Sistema NSATHEO-2.	41
4.3	Trilhas terrestres correspondentes ao Sistema USAVKA-H1.	42
4.4	Trilhas terrestres correspondentes ao Sistema USAKU-H2.	42
4.5	Trilhas terrestres correspondentes a 3 Sistemas NSATHEO-2.	43
4.6	Trilhas terrestres correspondentes a 3 Sistemas USAVKA-H1.	43
4.7	Trilhas terrestres correspondentes a 3 Sistemas USAKU-H2.	44
4.8	Diagrama de radiação das antenas receptoras do Serviço Fixo Terrestre ($G_{max}=39$ dBi)	46
4.9	Diagrama de radiação da antena de transmissão do satélite HEO ($G_m=50$ dBi)	48
A.1	Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição $(-20^\circ S, 0^\circ W)$. A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	66

- A.2 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 67
- A.3 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 68
- A.4 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 69
- A.5 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 70
- A.6 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 71
- A.7 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 72
- A.8 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-20^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 73
- A.9 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 74
- A.10 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 75
- A.11 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 76

- A.12 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 77
- A.13 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 78
- A.14 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 79
- A.15 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 80
- A.16 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($-10^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 81
- A.17 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 82
- A.18 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 83
- A.19 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 84
- A.20 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 85
- A.21 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 86

- A.22 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 87
- A.23 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 88
- A.24 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($0^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 89
- A.25 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 90
- A.26 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 91
- A.27 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 92
- A.28 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 93
- A.29 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 94
- A.30 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 95
- A.31 Diagramas de azimuth correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO. 96

A.32 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($10^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	97
A.33 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	98
A.34 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 0^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	99
A.35 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	100
A.36 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 30^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	101
A.37 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	102
A.38 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	103
A.39 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso SEM considerar o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	104
A.40 Diagramas de azimute correspondentes à proteção de um receptor FS localizado na posição ($20^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{W}$). A antena do receptor FS tem Ganho de 39 dB e elevação de 0° . Caso considerando o diagrama de radiação das antenas dos satélites dos sistemas HEO.	105
B.1 Interação gravitacional entre dois corpos de massas M e m.	106
B.2 Parâmetros Orbitais	109
B.3 Terra com plano da órbita elíptica e os parâmetros orbitais	110

Lista de Tabelas

4.1	Máscaras de Densidade de Fluxo de Potência (18 GHz)	40
4.2	Características técnicas dos Sistemas HEO considerados	41
4.3	Características dos receptores FS	45
4.4	Latitude -30, sem considerar diagrama da antena	50
4.5	Latitude -30, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	51
4.6	Latitude -30, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	51
4.7	Latitude -20, sem considerar diagrama da antena	52
4.8	Latitude -20, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	52
4.9	Latitude -20, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	53
4.10	Latitude -10, sem considerar diagrama da antena	53
4.11	Latitude -10, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	54
4.12	Latitude -10, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	54
4.13	Latitude 0, sem considerar diagrama da antena	55
4.14	Latitude 0, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	55
4.15	Latitude 0, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	56
4.16	Latitude 10, sem considerar diagrama da antena	56
4.17	Latitude 10, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	57
4.18	Latitude 10, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	57
4.19	Latitude 20, sem considerar diagrama da antena	58
4.20	Latitude 20, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	58
4.21	Latitude 20, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	59
4.22	Latitude 30, sem considerar diagrama da antena	60
4.23	Latitude 30, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 10^\circ$	61
4.24	Latitude 30, considerando o diagrama da antena, para $\theta_{min} = 20^\circ$	61